

Présentation de l'activité du LGEP

Les problématiques dans le domaine des contacts de puissance

*LGEP : Laboratoire de Génie Électrique de Paris
UMR 8507 CNRS-SUPELEC, Université Paris-Sud 11 et UPMC*

Présentation succincte de l'Équipe "Contacts Électriques" du LGEP

Novembre 2009 : 4 chercheurs, 3 post-docs ou CLD, 3 doctorants

Thématiques de l'équipe :

- ♦ Contacts bas niveau
(faible I et U pas d'effet thermique, pas d'arc)
- ♦ Nanocontacts (AFM conducteur)
- ♦ Contacts de puissance et interactions arc-électrodes




Deux types de sujets

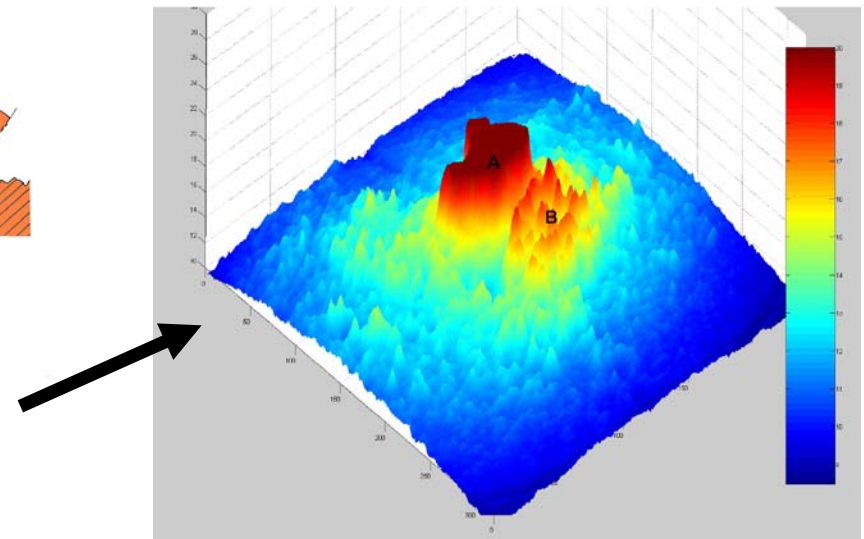
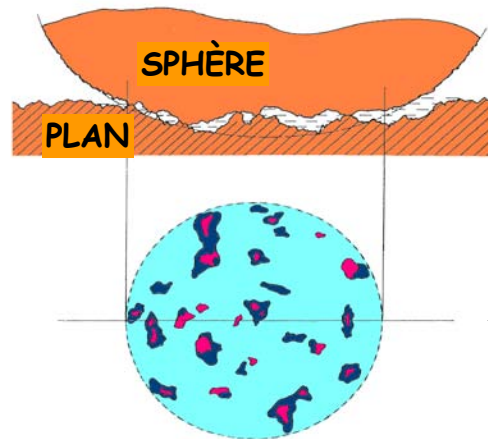
A - Sujets « propres » aux contacts de puissance:

- Contact fermé :

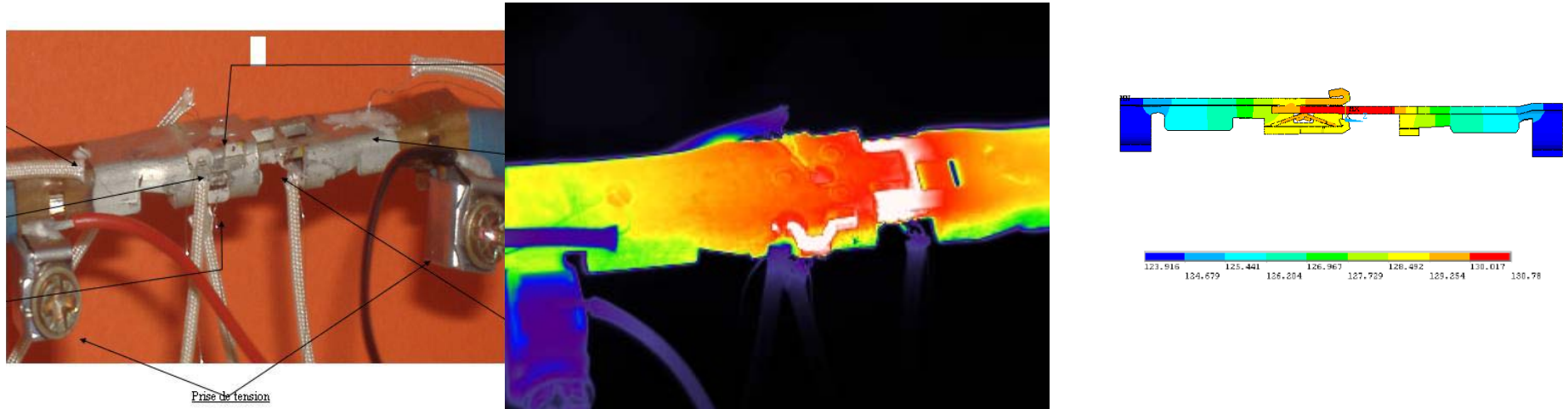
- Études concernant la détermination de la zone de passage de courant au niveau du contact

- Caractérisation par mesures électriques
- Mesure de l'échauffement local

 AIRE APPARENTE
DE CONTACT
»
 AIRE MÉCANIQUE
DE CONTACT
»
 AIRE ÉLECTRIQUE
DE CONTACT



- Tentatives de modélisation de l'échauffement d'un contact (problème couplé mécanique - électrique - thermique)



- **Contact ouvert (avec arc) :**
 - Étude de la coupure ou de la déconnexion de fortes intensités sous une tension continue (36/42 Vdc) :
 - Propriétés des matériaux de contact (coupure et érosion)

B - Sujets concernant les interactions arc - électrodes en général :

Études liées à une problématique industrielle

⇒ problèmes de fonds ⇒ objectifs « long terme »

Quelques sujets « de fond » :

- Comportement et structure d'un arc à proximité des électrodes :
 - Essayer de comprendre la diversité des observations et des résultats.
- Description de la zone d'interaction entre l'arc et l'électrode
 - Évaluer les échanges d'énergie entre l'arc et les électrodes (puissance, densité de puissance, température d'électrodes...)
 - Étudier les paramètres qui influent sur l'usure des électrodes

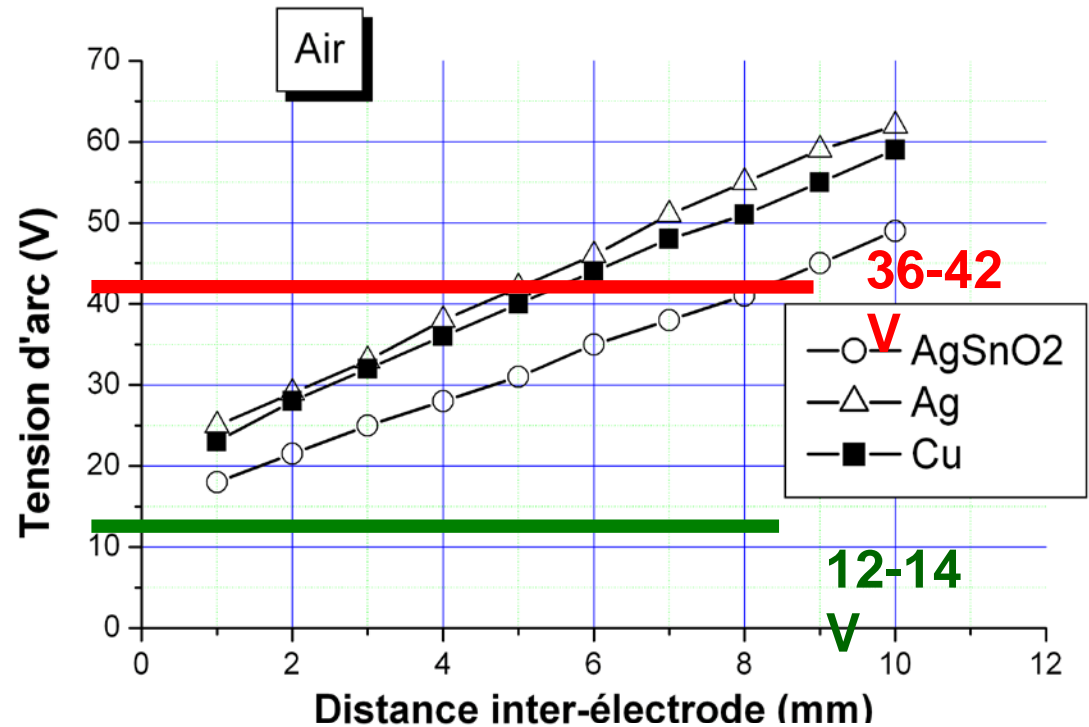
A - Étude de la coupure de fortes intensités sous une tension continue de 36/42 V dc

Contexte : augmentation des puissances embarquées dans les automobiles

⇒ augmentation des tensions

Objectifs :

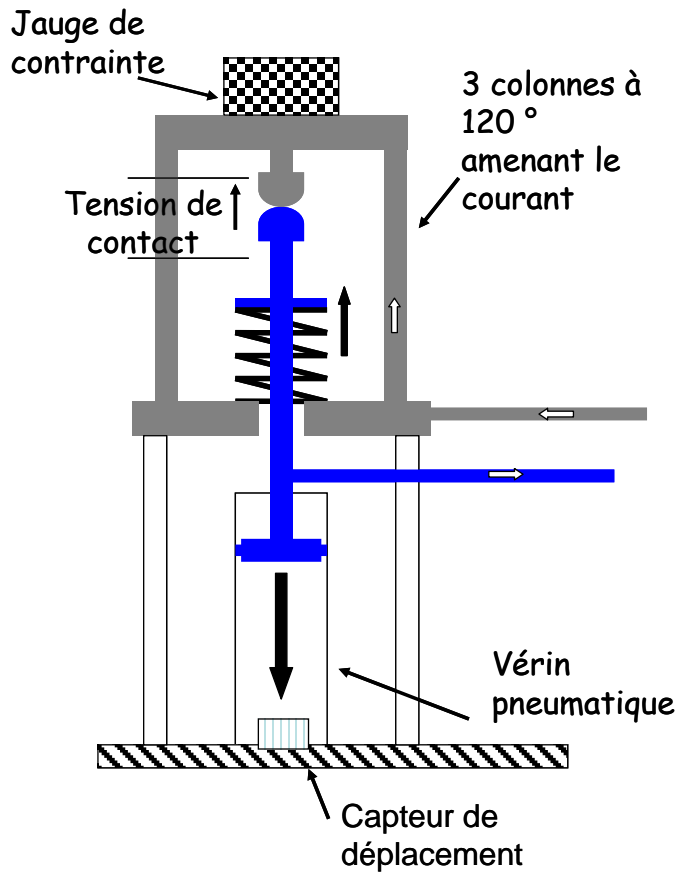
- Étude « exploratoire » de l'ouverture d'un contact dans ces conditions.
- Détermination des paramètres influents.
- Étude de l'usure des contacts.
- Optimisation des matériaux.



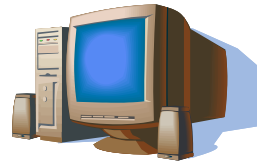
d < 1
mm

d → 8
mm

La partie mécanique



← Ouverture/fermeture du contact



→ Acquisition des données (Force, distance inter-électrode...)

- On mesure :

- $I(t)$
- $U_c(t)$
- $U_{arc}(t)$
- $d(t)$

- On déduit :

- $P(t)$
- $E(t)$
- $R_c(t)$
- d_{ext}

Les divers paramètres et les grandeurs qui nous intéressent

- Vitesse d'ouverture (entre 0,2 et 0,9 m/s), force de contact ($\approx qq$ N), distance inter-électrode d'extinction

⇒ dimensionnement de l'appareillage

- I (entre 100 et 1000 A) et L (entre 0,01 mH et 1 mH)

⇒ le circuit à ouvrir

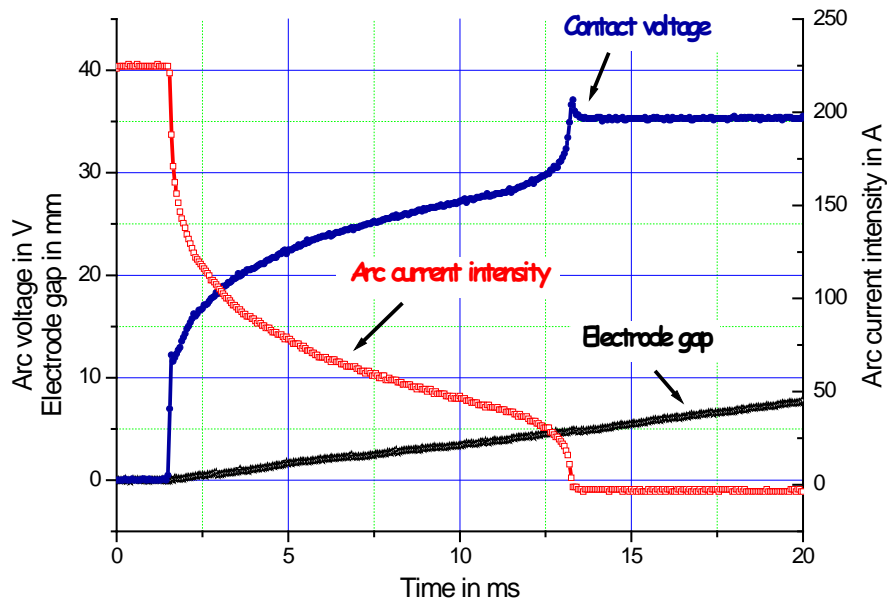
- Les matériaux (Ag, AgSnO₂ 12%, AgFeO₂ZrO₃ 5,4 %, AgNi 10%, AgZnO 8 et 10%)

- Rc ⇒ le contact fermé (endurance)

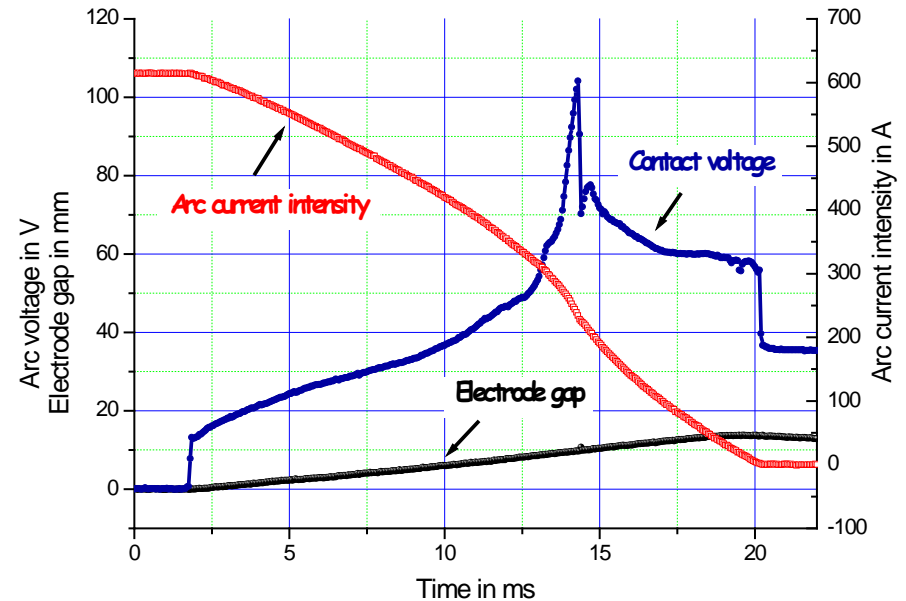
- Durée de l'arc ⇒ l'efficacité de la coupure

- Énergie dans l'arc, érosion ⇒ la durée de vie du contact

Exemples typiques de l'allure des signaux à l'ouverture du contact



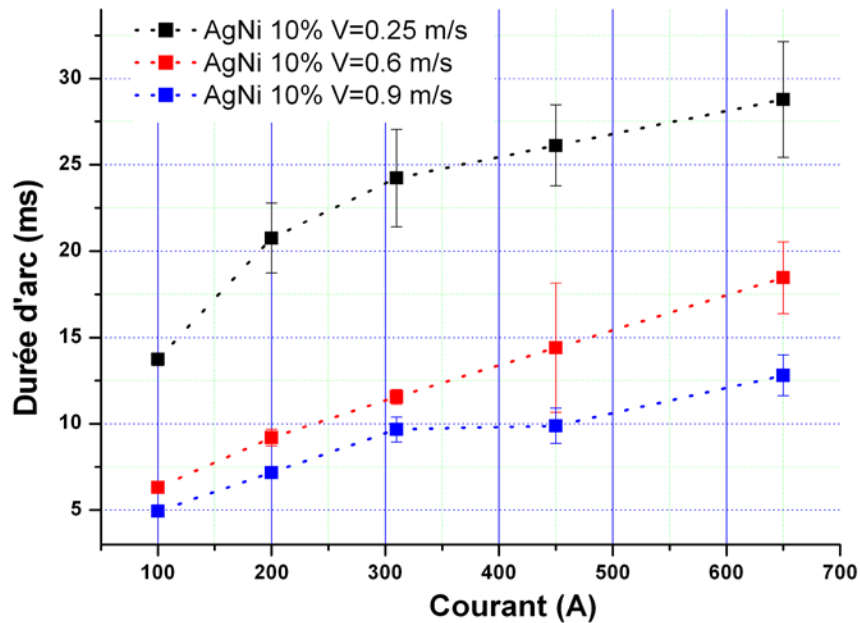
$L \approx 0 \text{ mH}$



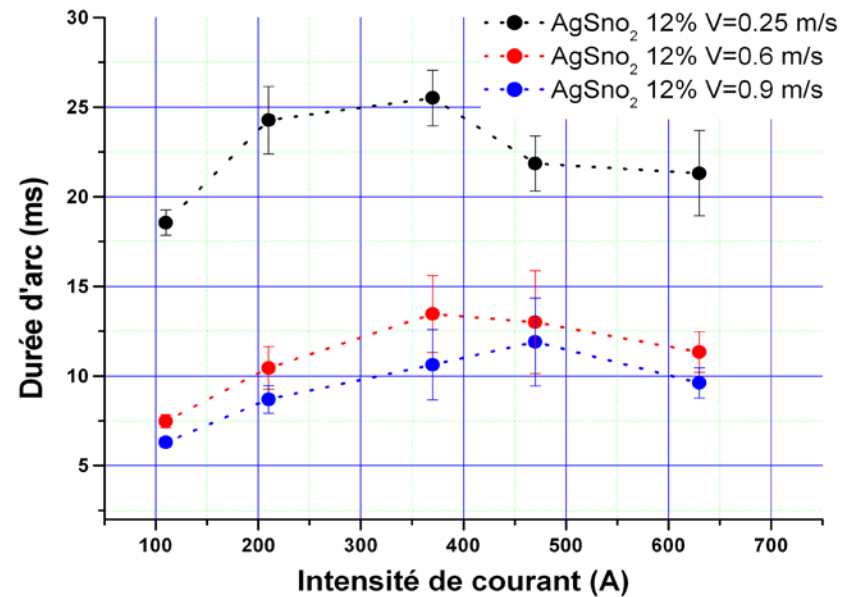
$L \approx 1 \text{ mH}$

Quelques exemples de résultats et des questions...

AgNi, AgFeO₂, AgZnO



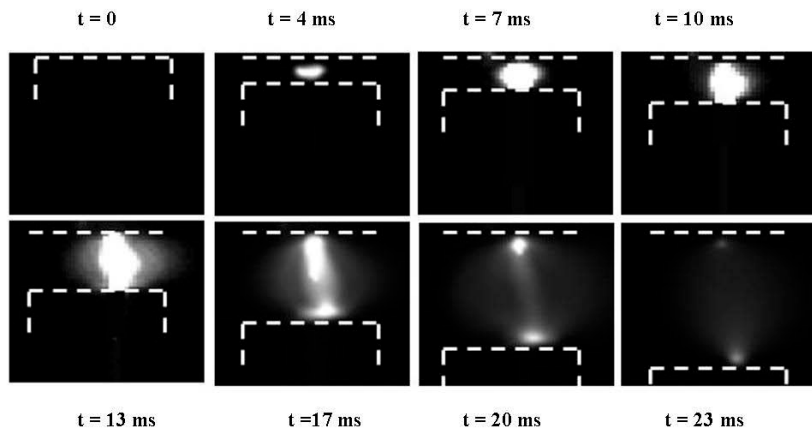
Ag, AgSnO₂



Cas $L = 0,3 \text{ mH}$

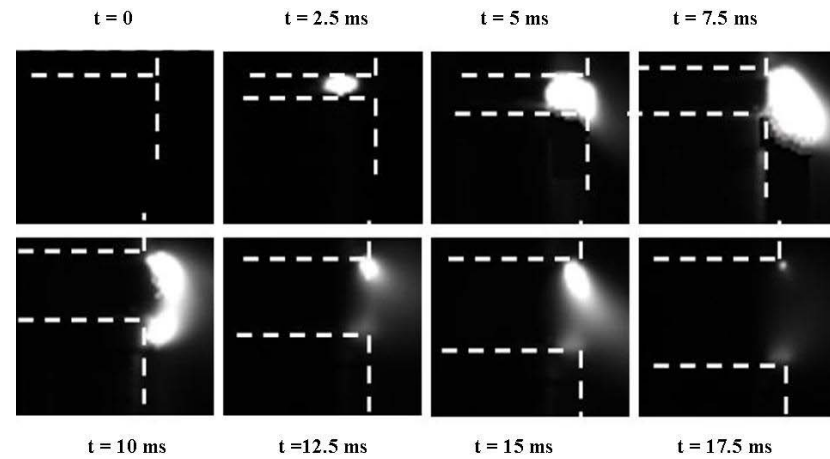
Des observations

$I = 280 \text{ A}$



Stabilité

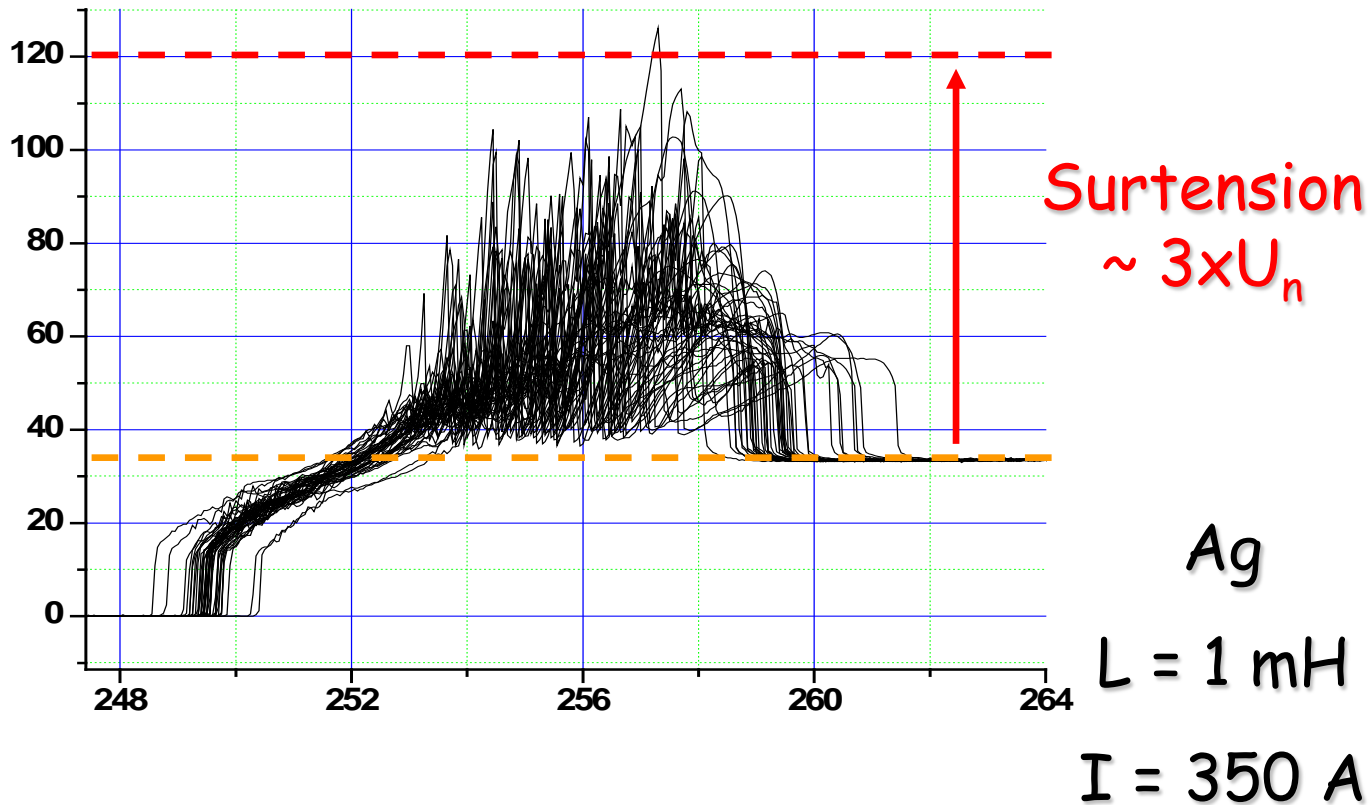
$I = 600 \text{ A}$



Instabilité

?

« Surtensions » lors de la coupure



Signaux parasites possibles sur des circuits faibles tensions
ou sur fiches voisines de connecteurs

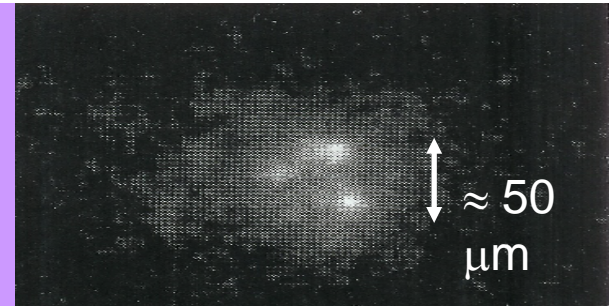
B - Les interactions arc-électrodes

Remarques préliminaires

La zone d'interaction arc-cathode : plusieurs niveaux de structures observés par divers auteurs

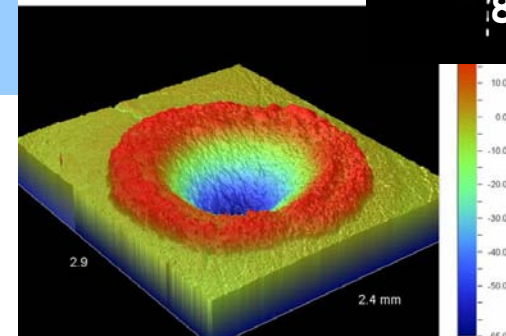
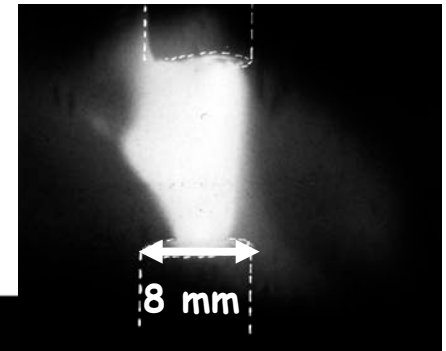
- Microspots cathodiques (ou fragments) :
 - Taille caractéristique $\langle D \rangle \approx 20 \mu\text{m}$
 - Durée de vie $\delta t \approx 10 - 20 \text{ ns}$.
- Spots cathodiques :
 - Taille caractéristique $\langle D \rangle \approx 50 - 100 \mu\text{m}$
 - Durée de vie $\delta t \approx \text{qq. } 10 \mu\text{s}$

« Vision microscopique »



- D'autres structures plus larges peuvent aussi être observées \Rightarrow « Pied d'arc »

« Vision macroscopique »



Les travaux entrepris

- **Travaux expérimentaux** (approche « macro »)
 - Observation des interactions (hypothèse pour les modèles) ($5 \cdot 10^5$ i/s)
 - Étude expérimentale de l'érosion :
 - Caractérisation des « cratères »
 - Mesure des quantités de métal fondu par l'arc
 - Spectroscopie (apparition des vapeurs métalliques)
 - Mesure de la température de surface d'une électrode
 - **Travaux de modélisation** : (approche « macro » ou « micro »)
 - Modélisation thermique 2D et 3D
 - Contribution à la modélisation de la zone cathodique de l'arc
 - Lien entre la vision macroscopique et la vision microscopique
- ⇒ Utilisation conjointe résultats expérimentaux et modèles
- ⇒ « problème inverse » - estimation du bilan de puissance

Quelques résultats

Commentaires

- Contribution à la modélisation de la zone cathodique

Une approche microscopique

- Contribution à la détermination du bilan de puissance

Une approche macroscopique

- Commentaires et questions concernant les deux visions

- Lien entre la vision microscopique et la vision macroscopique : un problème multi-échelle

- La mesure d'une propriété macroscopique : la température de surface des électrodes

Contribution à la modélisation de la zone cathodique

⇒ Approche microscopique

-Phénomènes d'émission électronique

- modèle numérique pour l'émission TF

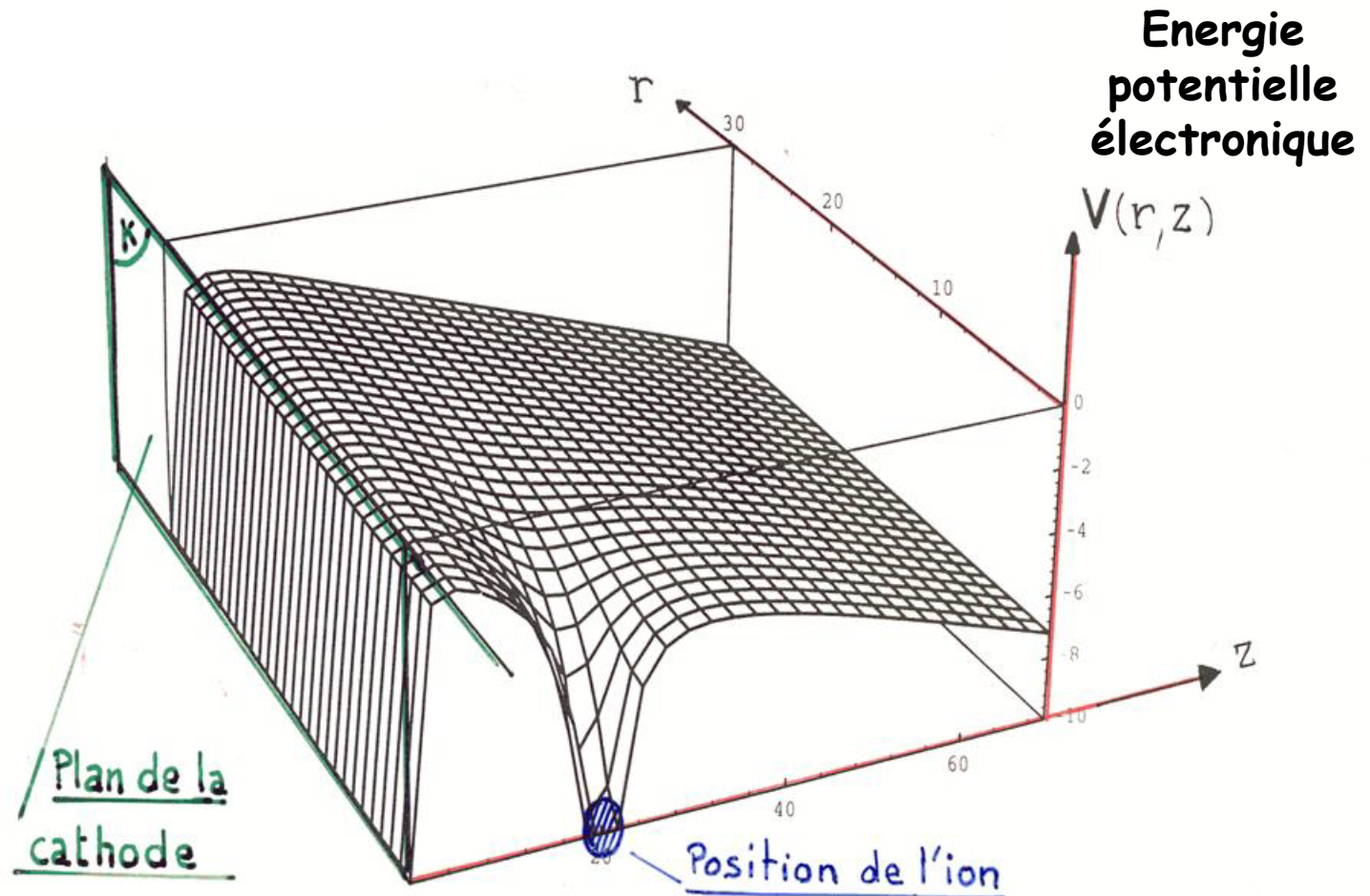
- modélisation de l'influence des ions bombardant la cathode sur l'émission électronique (1D et 3D)

-Estimation du bilan de puissance

- modèle numérique pour l'effet Nottingham

⇒ Zone très proche de la surface (qq. 10 nm)

Modélisation de l'influence des ions bombardant la cathode sur l'émission électronique (1D et 3D)



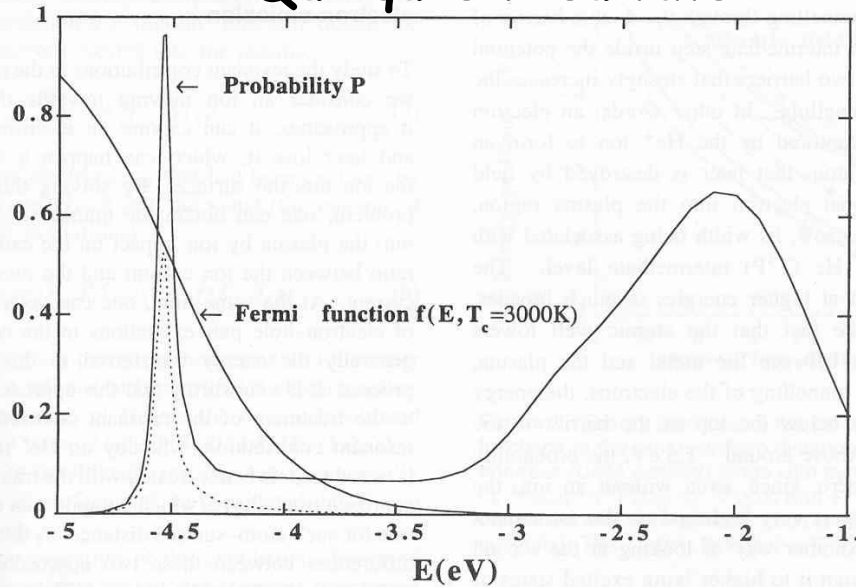
La démarche

- Résolution de l'équation de Schrödinger (Numérov ou méthode CAM)
- Equation pour la dynamique des ions qui s'approche de la surface

Paramètres susceptibles d'avoir une influence :

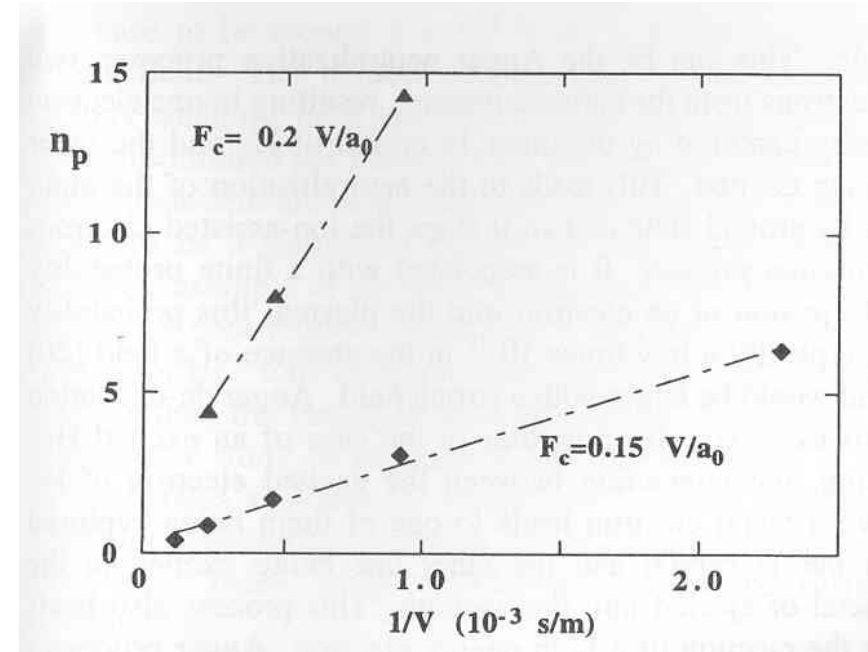
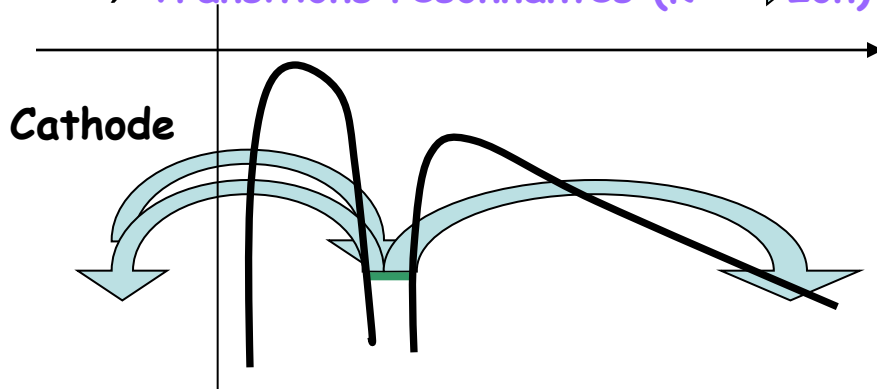
- Nature de la cathode
- Champ macroscopique
- Température de la cathode
- Vitesse des ions
- Nature des ions (Ar ou He)

Quelques résultats



Coef. de transmission = $f(E)$ - Proba de « sortir » de la cathode

⇒ Transitions résonnantes (K → Ion)



Nbre d'électrons émis = $f(1/V)$
par ion incident

⇒ Augmentation de l'émission
électronique

De nombreuses questions

Dans la zone proche de la cathode :

- nombreux phénomènes d'ionisation/neutralisation avec ré-émission des électrons vers le plasma ou vers le métal (transfert d'énergie vers le métal)

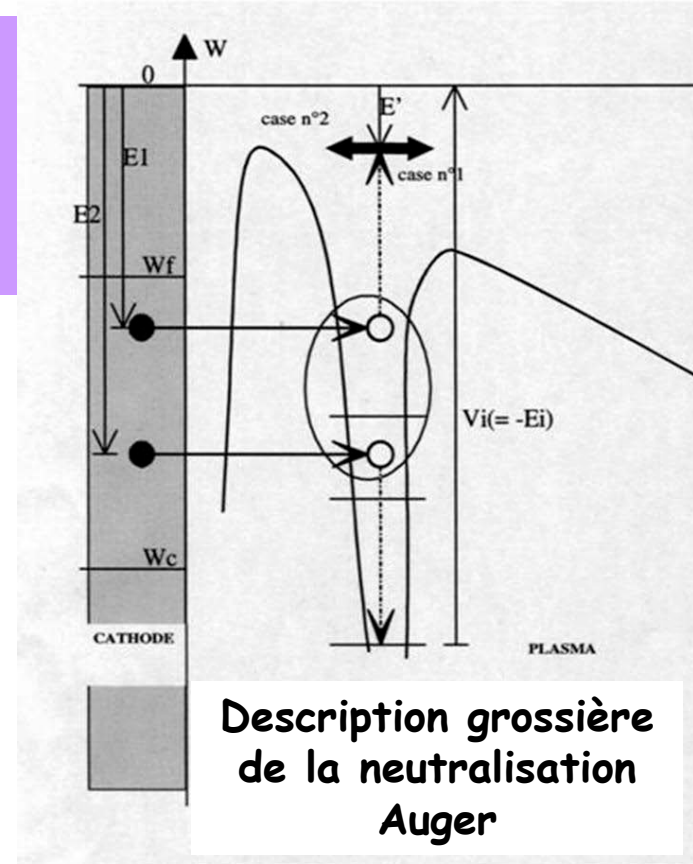
- les ions voyagent sous la forme de neutres (pas d'accélération par le champ)

- les ions arrivent sous la forme d'ions sur la surface (neutralisation Auger)

Conséquences sur l'estimation du bilan énergétique

≠ approches classiques :

- zone sans interactions entre particules
- accélération des ions par le champ électrique



Contribution à la détermination du bilan de puissance

Comment l'observation des cratères créés par l'arc permet d'obtenir des informations sur la puissance et la densité surfacique de puissance apportée aux électrodes

Une approche macroscopique

Une vision macroscopique du bilan de puissance

On introduit une "tension équivalente"

$$P_C = I V_{eq} \text{ (W)}$$

$$Q_C \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Une première étape expérimentale

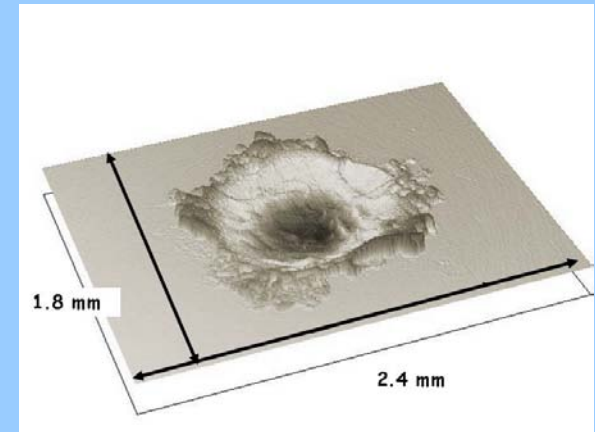
Conditions expérimentales : arcs dans l'air à pression atmosphérique :

- Durée $\approx 300 \mu\text{s}$
- $I = 100 - 2500 \text{ A}$
- $d = 100 \mu\text{m}$
- Electrodes en cuivre

Observation et mesures au
profilomètre optique 3D :

\Rightarrow Volumes déplacés

\Rightarrow rayons et profondeurs des
cratères



\Rightarrow Valeurs minimales pour le volume, le rayon
et la profondeur fondus \Leftrightarrow critères pour la
modélisation

Une seconde étape de modélisation de l'échauffement :

- Différences finies, changement de phases, frontières mobiles

Objectif:

On cherche V_{eq} et Q pour respecter les critères expérimentaux

Résultats obtenus sur plusieurs dizaines d'essais

⇒ Dans + de 50% des cas les critères sont respectés pour

$$9 \text{ V} \geq V_{eqC} \geq 5.4 \text{ V}$$

$$12.6 \text{ V} \geq V_{eqA} \geq 9 \text{ V}$$

$$7 \times 10^9 \text{ W/m}^2 \geq Q_{eqC} \geq 6 \times 10^9 \text{ W/m}^2$$

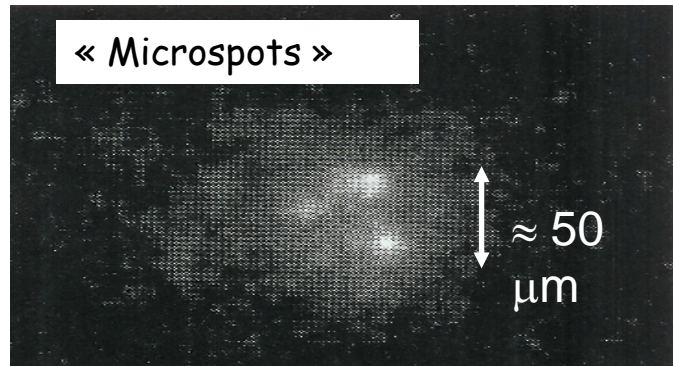
$$6.5 \times 10^9 \text{ W/m}^2 \geq Q_{eqA} \geq 5.5 \times 10^9 \text{ W/m}^2$$

Commentaires et questions :

Existe-t-il un lien entre la vision microscopique et
la vision macroscopique ?
un problème multi-échelle

Collaboration avec l'ICB

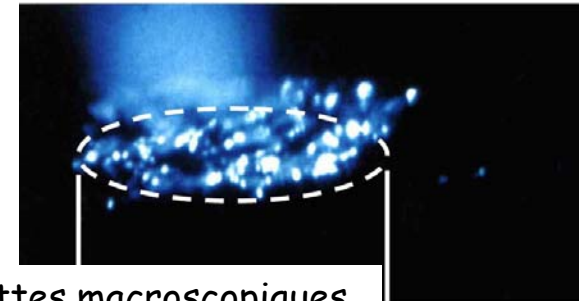
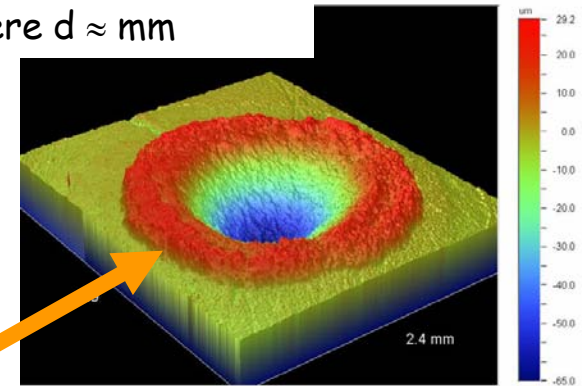
Des observations très différentes :



- Est-ce le résultat d'un chauffage par un flux unique et immobile ou par une multitude de flux instationnaires ?

- Quel lien entre les observations macroscopiques et microscopiques ?

cratère d \approx mm



Une énorme dispersion pour des grandeurs essentielles :

-la densité de courant au niveau des électrodes

$$10^8 \text{ A/m}^2 \leq \textcolor{red}{J} \leq 10^{13} \text{ A/m}^2$$

- la densité surfacique de puissance apportée aux électrodes

$$10^8 \text{ W/m}^2 \leq \textcolor{red}{Q} \leq 10^{13} \text{ W/m}^2$$

Comment peut-on expliquer cela ?

Ces valeurs sont-elles compatibles ?

- **Quel lien entre les observations macroscopiques et microscopiques ?**

Idée de départ : \neq échelles spatiales et temporelles d'observation

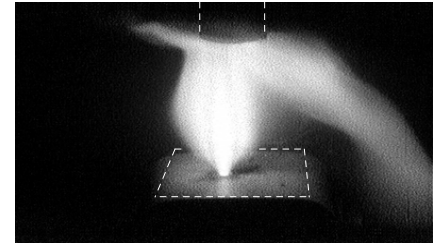
Idée de départ

$$10^8 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 10^{13} \text{ W/m}^2$$



$\approx \text{ns}$

$\approx \text{ms à s}$



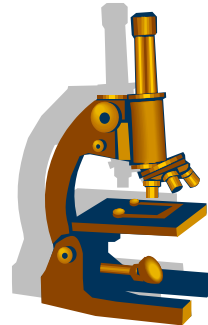
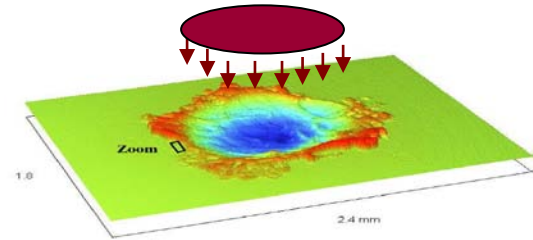
?



$Q \approx 10^{13} \text{ W/m}^2$
Microspots

$\approx \mu\text{m}$

$\approx \text{mm}$



$Q \approx 10^8, 10^9 \text{ W/m}^2$
Pied d'arc

Chauffage par plusieurs flux :

- très intenses
- très mobiles
- durée de vie limitée (20 ns)

Chauffage par un flux
immobile durant une durée
++++ importante

⇒ une première approche « thermique »

Première étape

Tentative de lien entre microspots et spot

Microspot :

- $I \approx 10 - 20 \text{ A}$
- $\langle D \rangle \approx 20 \mu\text{m}$
- $\delta t \approx 10 - 20 \text{ ns.}$

Spot cathodique :

- $I \approx 50 - 100 \text{ A}$
- $\langle D \rangle \approx 50 - 100 \mu\text{m}$
- $\delta t \approx \text{qq. } 10 - 20 \mu\text{s.}$

Idée : Chauffage par un arc 50 A - durée 20 μs
⇒ 2 possibilités

5 Microspots de 10 A

- $\delta t \approx 20 \text{ ns}$

Loi de déplacement (Jüttner)

$$W(R).dR = \frac{2R}{a} \exp\left(-\frac{R^2}{a}\right) dR$$

1 Spot de 50 A

- $\delta t \approx 20 \mu\text{s}$

- Immobile

Chauffage par 5 microspots

Microspot :

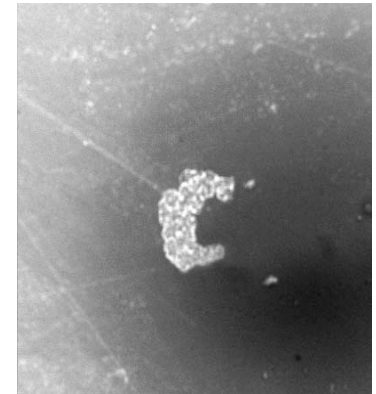
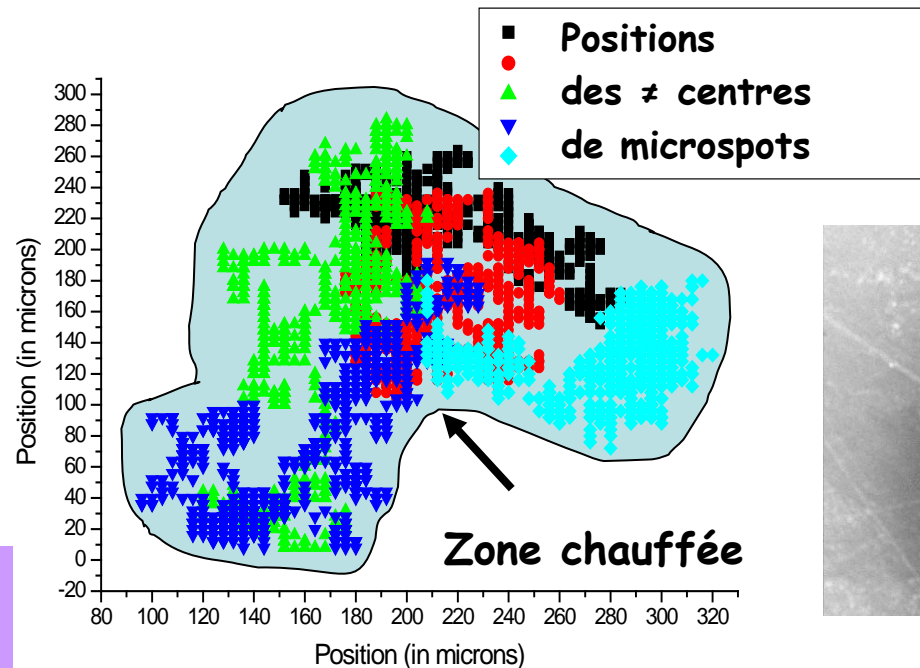
- $I \approx 10 - 20 \text{ A}$
- $\langle D \rangle \approx 20 \text{ }\mu\text{m}$
- $\delta t \approx 10 - 20 \text{ ns.}$

- $J = 7 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$

- $Q = 3 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^2$

- Critères sur dimensions de la zone fondue

- Plusieurs calculs



Résultats (après 27 calculs) :

- Profondeur de la zone fondue $\approx 25 \text{ }\mu\text{m}$
- Extension moyenne en surface de la zone fondue $\approx 125 \text{ }\mu\text{m}$

Chauffage par 1 spot cathodique immobile

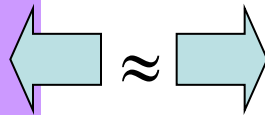
Quelles caractéristiques du flux pour un chauffage équivalent ?

- Profondeur de la zone fondue $\approx 25 \mu\text{m}$
- Extension moyenne en surface de la zone fondue $\approx 125 \mu\text{m}$

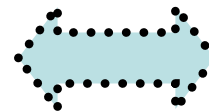
$$\text{Calcul 2D} \Rightarrow Q = 5.10^{10} \text{ W/m}^2 \text{ et } J \approx 5.10^9 \text{ A/m}^2$$

Premières conclusions

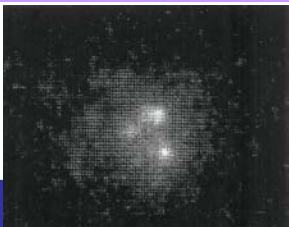
Microspots: (20 ns)
 $J = 7.10^{10} \text{ A/m}^2$
 $Q = 3.10^{11} \text{ W/m}^2$



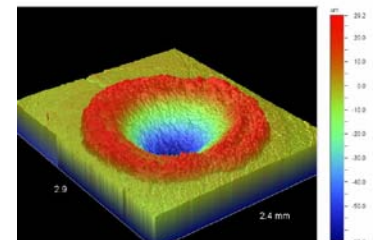
Spots: (20 μs)
 $J \approx 5.10^9 \text{ A/m}^2$
 $Q = 5.10^{10} \text{ W/m}^2$



Pied d'arc
(cratères macro)
?



A confirmer
Critères ?



La mesure d'une propriété macroscopique
: la température de surface des
électrodes pour des électrodes à bas
point de fusion (Cu, Ag, Al...) - Arc non
stationnaire dans l'air

Intérêts :

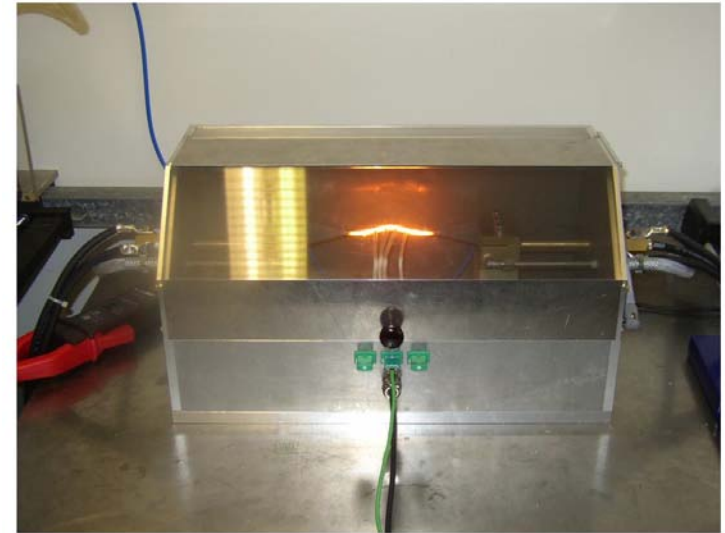
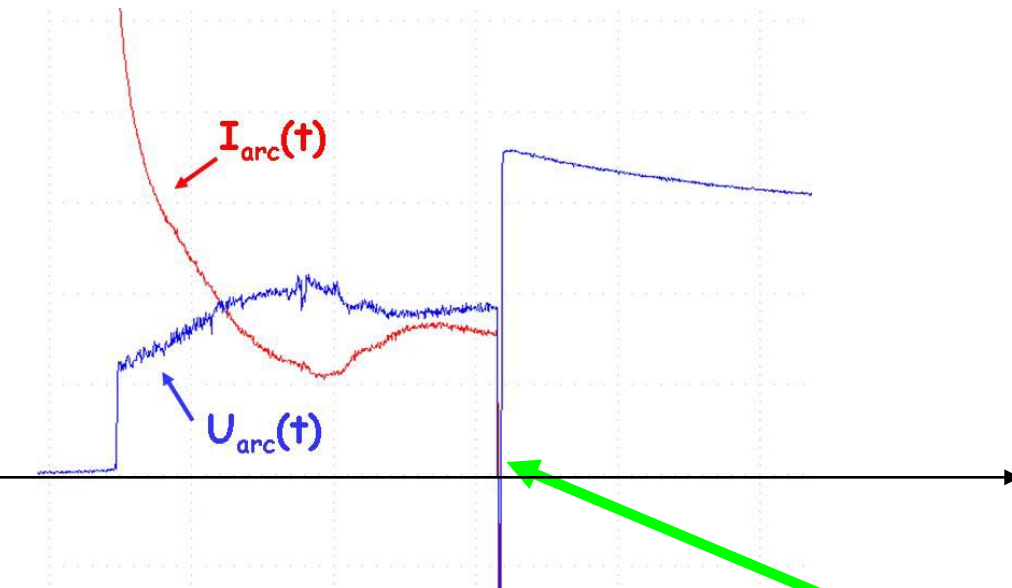
- « Amont » : grandeur incertaine jusqu'à présent
- Pour la détermination du bilan de puissance aux électrodes
(4 ordres de grandeurs dans la littérature) \Rightarrow problème inverse

Difficultés (nombreuses) :

- la température varie très vite \Rightarrow temps d'acquisition très courts \Rightarrow mesure optique
- l'arc masque la surface ...
- $\varepsilon(T)$ pour Cuivre ...

Solutions « proposées »:

- Caméra à faible temps d'intégration
- Coupure très rapide l'arc (20 μ s) pour éviter que T chute vite
- Calibration de la caméra



Actuellement limitation à $T < T_{fusion}$
 \Rightarrow four haute température ??

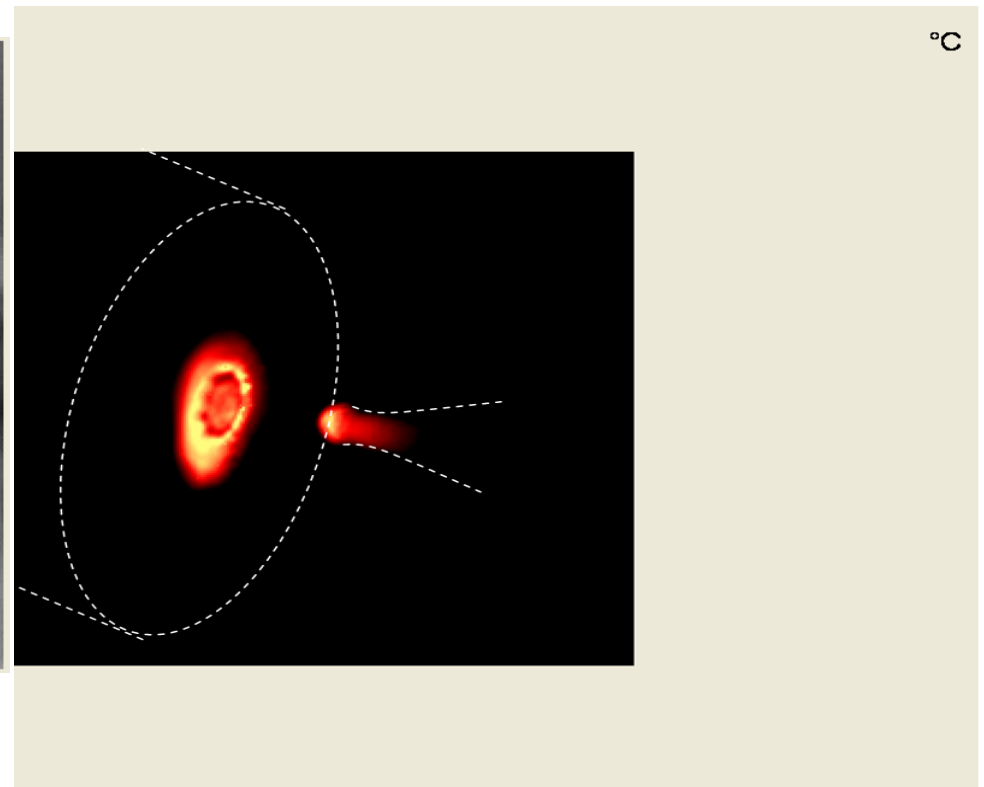
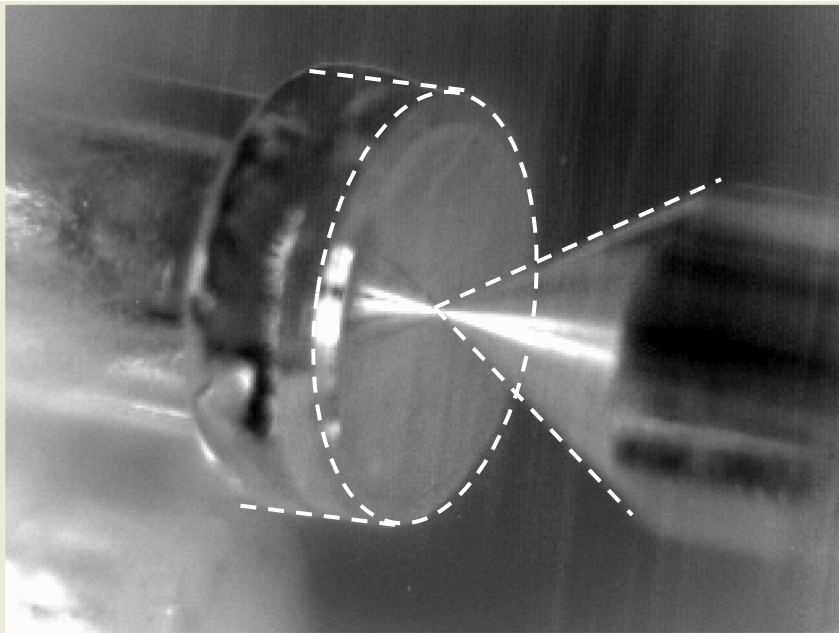
Image 20 μ s après coupure

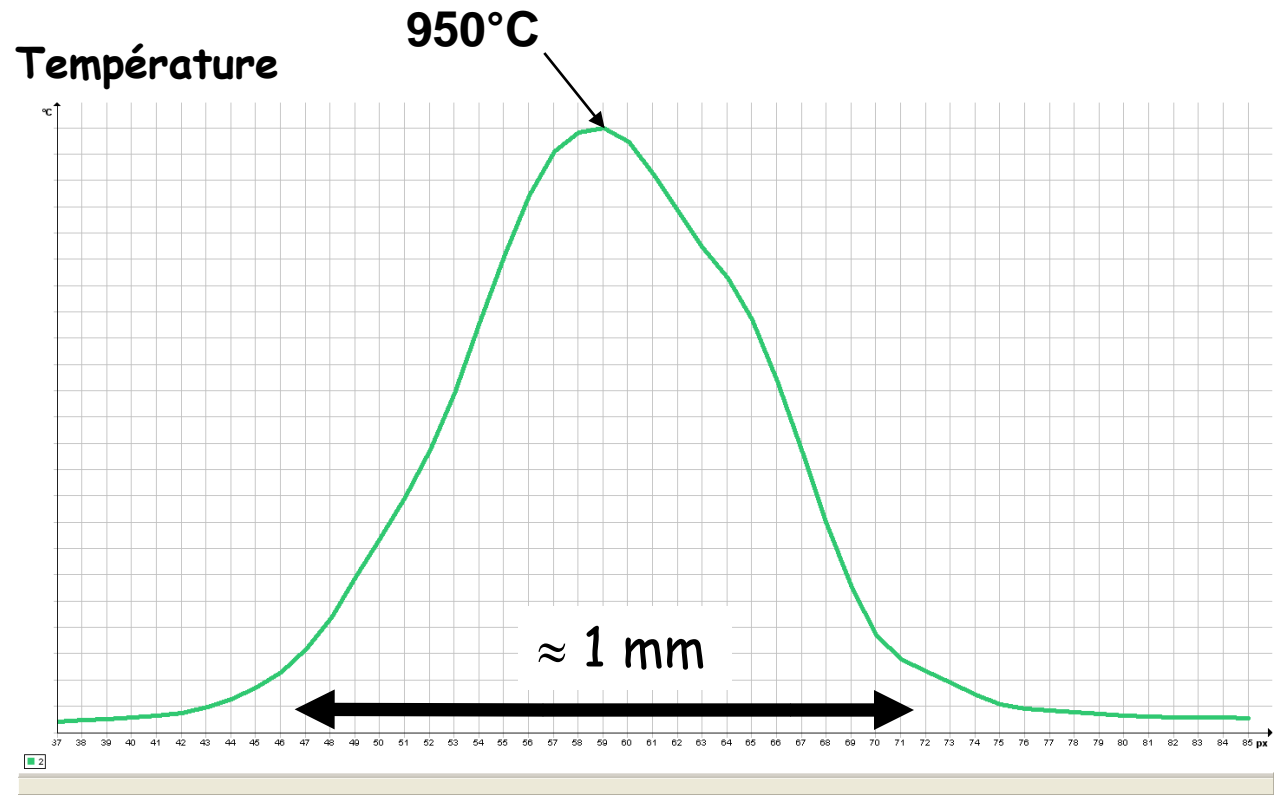
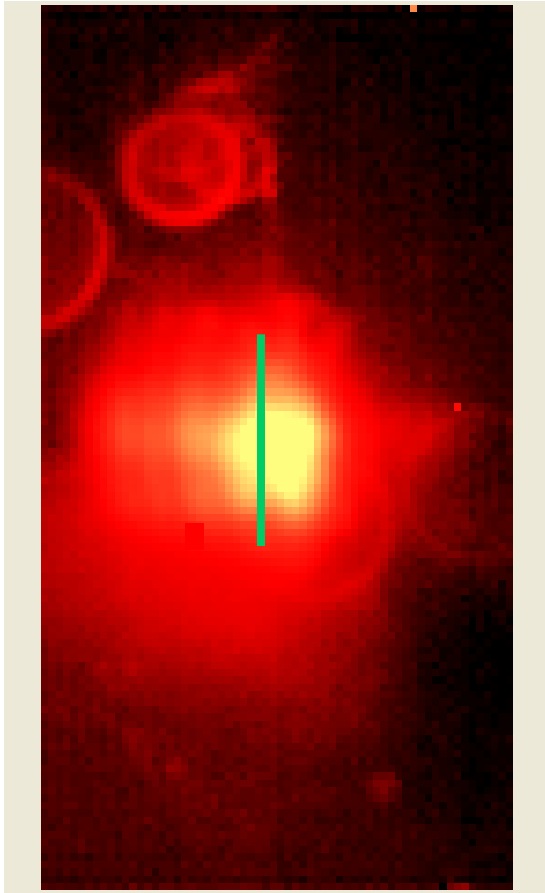
Premières mesures électrodes en Cuivre

Caméra thermique rapide :

temps d'intégration : $25 \mu s$

filtre 600 - 900 °C avec bande
spectrale 3,7- 4,8 μm





$\langle I_{\text{arc}} \rangle \approx 200 \text{ A} - \text{durée} \approx 10 \text{ ms} - \delta t = 20 \mu\text{s}$

Température $\approx 30 \mu\text{s}$ après $I = 0 \text{ A}$

Limitations, difficultés et perspectives :

- Mesure à une échelle macroscopique :

- la meilleure définition du pixel $\approx 30 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$.
- la meilleure résolution temporelle $\approx 7 \mu\text{s}$ pour les très hautes températures

\Rightarrow on ne peut pas voir les « spots »

- Calibration de la caméra pour $T > T_{\text{fusion}}$
- Problème inverse (échelle macroscopique)

Etude de la transition « décharge luminescente /arc électrique » à pression subatmosphérique

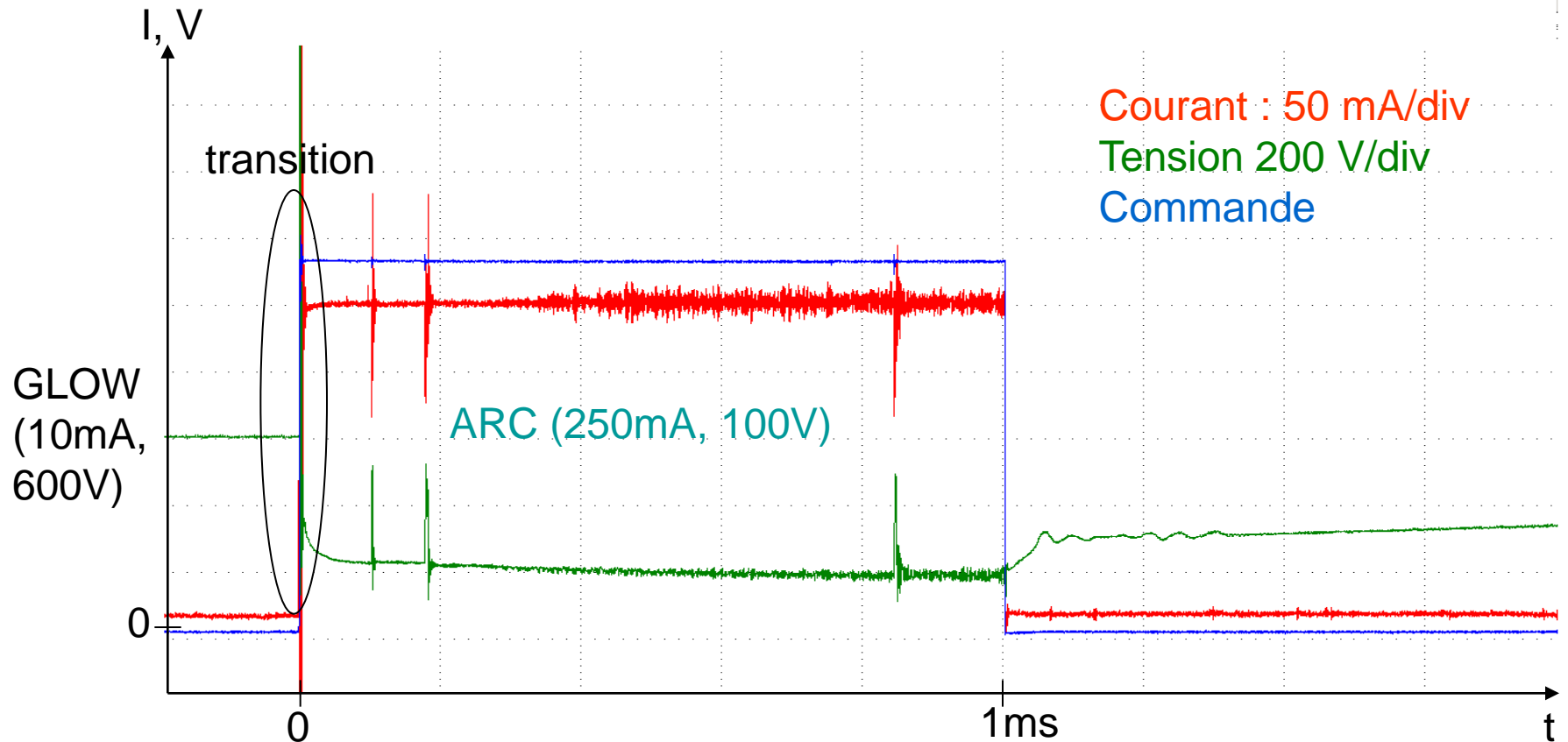
Thèse R. Landfried - Financement C3S
Collaboration avec le Dpt Energie de Supelec et ICB

Objectifs :

- Comprendre les phénomènes physiques qui conduisent à la transition
- Etudier expérimentalement les conditions de la transition
- Proposer une modélisation simple afin de déterminer les facteurs responsables de la transition
- Vérification de la validité du modèle grâce à l'expérience

Les premières mesures

Réalisation d'une alimentation permettant de générer la transition pour des pressions allant de 0,1 bar à 1 bar dans de l'argon.



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : -1

-00.000013

Les premières observations

$t = -13 \mu s$

ANODE

CATHODE

Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 0

+00.000000

$t=0 \mu s$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 1

+00.000013

$t=13\ \mu\text{s}$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

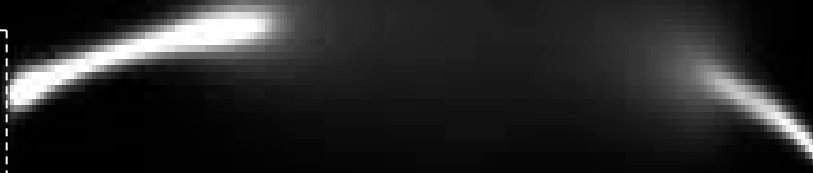
image : 2

+00.000027

$t=27 \mu s$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 3

+00.000040

$t=40\ \mu\text{s}$

ANODE

CATHODE



Photon

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 4

+00.000053

$t=53 \mu s$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 5

+00.000067

t=67 μ s

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 6

+00.000080

$t=80\ \mu\text{s}$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 7

+00.000093

$t=93 \mu s$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 8

+00.000107

$t=107 \mu s$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

image : 9

+00.000120

$t=120\ \mu\text{s}$

ANODE

CATHODE



Photron

FASTCAM SA1.1 mo... Partition : 001

75000 i/s

1/75000 sec

512 x 128

Milieu

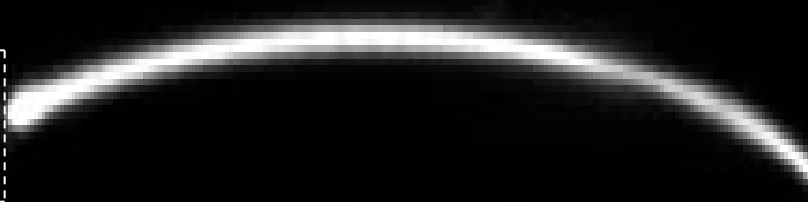
image : 10

+00.000133

$t=133\ \mu\text{s}$

ANODE

CATHODE



La suite

D'un point de vue expérimental:

- Etude de l'influence de divers paramètres sur la transition

Du point de vue de la modélisation:

- Arriver à passer d'un modèle de *Glow* à un modèle d'arc.
 - Phénomènes aux électrodes (émission \neq) ?
 - Phénomènes dans le plasma ?

Merci

pression

